

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Darko Antolic

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar, dipl. ing.

Student:

Darko Antolic

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru prof.dr.sc. Damiru Ciglaru na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima pruženim tijekom izrade ovog rada.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji koji su poticali moju ustrajnost te mi pružili veliku podršku tijekom dosadašnjeg studiranja.

Također, zahvaljujem svojim kolegama i prijateljima na potpori i pomoći.

Darko Antolic



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DARKO ANTOLIC**

Mat. br.: 0035192233

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **HIBRIDNI ALATNI STROJEVI**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **HYBRID MACHINE TOOLS**

Opis zadatka:


Hibridni alatni strojevi su numerički upravljani alatni strojevi koji imaju mogućnost obavljanja aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem čestica. Prvenstvena im je namjena popravak visoko vrijednih oštećenih ili istrošenih čeličnih dijelova na jednom stroju. Aditivnom tehnologijom, pomoću laserskog oblaganja bi se nadomjestio oštećeni ili istrošeni dio tog skupog dijela, a zatim bi se tehnologijom obrade odvajanjem čestica taj dio obradio i tako bi mu se vratila funkcionalnost.

U radu je potrebno dati literaturni pregled dostupnih izvedbi hibridnih alatnih strojeva, opisati njihov rad i namjenu, te dati osnovne karakteristike tih suvremenih obradnih sustava.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Damir Ciglar

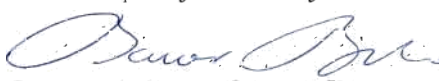
Rok predaje rada:

- 1. rok: 24. veljače 2017.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
- 3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
- 3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. INDUSTRIJA 4.0	4
3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA I OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA.....	8
4. HIBRIDNA TEHNOLOGIJA LASERSKOG OBLAGANJA I GLODANJA	12
4.1 Izvedbe hibridnih alatnih strojeva	13
4.1.1. Lasertec 65 3D.....	14
4.1.2. Integrex i-400 AM.....	21
5. HIBRIDNA ULTRAZVUČNA TEHNOLOGIJA	25
5.1 Izvedbe hibridnih ultrazvučnih alatnih strojeva	26
5.1.1 Ultrasonic 10.....	27
5.1.2 Ultrasonic 20 linear.....	28
5.1.3 Ultrasonic mobileBlock.....	30
5.2 Područje primjene	34
5.2.1 Ultrazvučno brušenje.....	35
5.2.2 Ultrazvučno glodanje.....	41
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1.	Razvoj industrijskih revolucija kroz povijest [3].....	4
Slika 2.	Koncept „pametne „ tvornice [4]	5
Slika 3.	Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [6].....	10
Slika 4.	Izvedbe alatnih strojeva [7]	11
Slika 5.	Tehnološki centri aditivne proizvodnje tvrtke DMG MORI [8].....	12
Slika 6.	Hibridni alatni stroj Lasertec 65 3D [8]	14
Slika 7.	Značajke hibridnog alatnog stroja „Lasertec 65 3D“ [8].....	15
Slika 8.	Postupak laserskog oblaganja [8]	16
Slika 9.	Postupak 5-osnog glodanja s okretno-nagibnim stolom [9].....	16
Slika 10.	Primjeri namjene hibridnih alatnih strojeva [8]	17
Slika 11.	Kućiste turbine	18
Slika 12.	Računalni model obratka za aditivne postupke i obrade.....	20
Slika 13.	Hibridni višenamjenski alatni stroj Integrex i-400 AM [12]	21
Slika 14.	Dvije vrste laserskih glava [12]	22
Slika 15.	Praktični primjer hibridne obrade na stroju Integrex i-400 AM [12]	24
Slika 16.	Glavne značajke ultrazvučne obrade odvajanjem čestica [13]	26
Slika 17.	Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic 10“ [13]	28
Slika 18.	Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic 20 linear“ [13]	29
Slika 19.	Izmjenjivač alata sa spremište za 30 alata [13]	30
Slika 20.	Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic mobileBlock“ [13].....	31
Slika 21.	Vakuumske nožice s kuglastim zglobovima [13]	32
Slika 22.	Prilagođavanje hibridnog ultrazvučnog alatnog stroja „Ultrasonic mobileBlock“ na dijelove zrakoplova [14].....	34
Slika 23.	Primjeri optičkih dijelova [13]	39
Slika 24.	Primjeri visokokvalitetnih keramičkih dijelova po područjima [13]	39
Slika 25.	Primjeri dijelova iz industrije satova [13]	40
Slika 26.	Primjeri kalupnih dijelova [13]	40
Slika 27.	Primjer dijelova turbine [13].....	41
Slika 28.	Primjeri dijelova motora i pogonski dijelovi [13]	42
Slika 29.	Primjeri kompozitnih dijelova [13].....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Redoslijed postupaka obrada kućišta turbine [10]	18
Tablica 2. Karakteristike obrade ultrazvučnim brušenjem [13]	36
Tablica 3. Rezultati: mjerenje sila rezanja [13].....	37
Tablica 4. Rezultati: kvaliteta površine (mikroskop) [13]	37

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
CNC	Computer Numerical Control
AM	Additive Manufacturing
ECM	Electrochemical Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
LENS	Laser Engineering Net Shaping
DMD	Direct Metal Deposition

SAŽETAK

Hibridni alatni strojevi su numerički alatni strojevi koji imaju mogućnost da se na jednom mjestu ostvaruju i aditivne tehnologije i tehnologije obrade odvajanjem čestica. Jedna od namjena im je popravak visoko vrijednih oštećenih ili istrošenih čeličnih industrijskih dijelova, te se također koriste pri izradi kompletnih dijelova do završnih dimenzija, sve na jednom stroju. Aditivnom tehnologijom, pomoću laserskog oblaganja bi se nadomjestio oštećeni ili istrošeni dio tog skupog dijela, a zatim bi se tehnologijom obrade odvajanjem čestica taj dio obradio i tako bi mu se vratila funkcionalnost. Za kompletnu izradu dijela, laserskim oblaganjem se prvotno izradi početni željeni oblik dijela po principu doziranja materijala sloj po sloj, te odmah nakon toga taj isti obradak, određenom obradom odvajanjem čestica, obradi do zahtjevane točnosti i kvalitete površine.

U ovom radu je naveden literaturni pregled dostupnih izvedbi hibridnih alatnih strojeva, opisan je njihov rad i namjena, te su date osnovne karakteristike tih suvremenih obradnih sustava.

Ključne riječi: hibridni alatni strojevi, aditivna tehnologija, obrada odvajanjem čestica, ultrazvučna strojna obrada

SUMMARY

Hybrid machine tools present numerical control machine tools that are capable of performing both of additive technology and machining in one place. One of their purpose is repair of high-value damaged or worn parts of steel in one machine tool, and also, it is used for production of complete parts. With additive technology, by laser deposition welding would be replaced damaged or worn area of that expensive part, and then with conventional machining generate to its final shape and give back its functionality. In order to produce complete part, by laser deposition welding would be built near-net shape component, and then by machining technology generate that same workpiece to the final dimension and surface quality.

In this paper it is given a literature review of various hybrid machine tools, described theirs working principles and purpose of use, and are given a basic features that kind of modern machining systems.

Key words: Hybrid machine tools, additive technology, machining, ultrasonic machining

1. UVOD

Suvremeni zahtjevi tržišta postavljaju sve strože zahtjeve pred procese razvoja i proizvodnje. Uz zahtjev za povišenje kvalitete obrade te samog proizvoda i razine fleksibilnosti pri razvoju i proizvodnji, istodobno se nameću zahtjevi za sniženje troškova, a posebice za skraćanje vremena razvoja i proizvodnje. Također su prisutni zahtjevi za većim iskorištenjima alatnih strojeva, za očuvanje okoliša, te pojava novih, teže obradivih materijala obradaka koji poprimaju sve veću važnost u suvremenim proizvodnim tehnologijama. Iz svega navedenog može se zaključiti koja bitna svojstva i obilježja mora posjedovati suvremeni obradni sustav. To je u prvom redu velika fleksibilnost i mogućnost brze reakcije na zahtjeve suvremenog konkurentnog tržišta. Najpovoljniji put za ostvarenje navedenih ciljeva je uvođenje fleksibilne automatizacije, te integriranje "inteligentnih" sustava upravljanja i komunikacije u obradne sustave. Suvremeno koncipirani alatni strojevi i obradni sustavi postaju, sa međusobnim povezivanjem, prilagodljivi za bilo koji tip industrijske proizvodnje. Prvi korak u pravcu razvitka fleksibilnih obradnih sustava bio je razvitak i proizvodnja numerički upravljanih alatnih strojeva. Razvitak numerički upravljanih alatnih strojeva uvjetovan je snažnim razvitkom elektronike i informatike, koja je omogućila proizvodnju "inteligentnih" sustava upravljanja, numerički upravljanim alatnim strojevima. Pod fleksibilnom proizvodnjom podrazumjeva se obrada na fleksibilnim obradnim sustavima tj. na grupi numerički upravljanih alatnih strojeva i obradnih centara, međusobno povezanih sustavom transporta i središnjom upravljačkom jedinicom. Hibridne tehnologije i hibridni alatni strojevi također predstavljaju jedan tip fleksibilne proizvodnje. Fleksibilnost hibridnih alatnih strojeva se temelji na fleksibilno automatiziranoj izmjeni nekoliko proizvodnih postupaka obrade, integriranih na jednom stroju, tj. platformi.

Hibridna proizvodnja predstavlja kombinaciju više različitih postupaka obrade ili strojeva spojenih u jednoj izvedbi sa svrhom izrade obradaka na što učinkovitiji i produktivniji način. Opći cilj takve proizvodnje prema [1], temelji se na efektu "1+1=3", što znači da je pozitivan učinak hibridnih postupaka više nego udvostručen u odnosu na prednosti pojedinačnih postupaka. Hibridna proizvodnja ima veliki potencijal za napredak u pogledu proizvodnje kompleksnijih dijelova sa boljom fleksibilnošću i osiguravanjem visoke točnosti u relativno kratkom vremenu obrade,

povećanju učinka skidanja materijala, te smanjenju trošenja alata. Hibridni procesi su otvorili novo područje za istraživanje i razvoj za poboljšanje mogućnosti obrada, minimiziranje nedostataka te proširenje područja primjene. Pojam "hibridno" prema literaturi [1] može imati više značenja: (1) kombinacija različitih izvora energije koji djeluju u isto vrijeme na područje obrade (npr. laserski asistirano tokarenje); (2) postupci koji kombiniraju nekoliko koraka izrade u jedan, a prije su se obavljali pojedinačno; (3) hibridni strojevi, integriranje različitih postupaka obrade u jednu obradnu platformu (npr. "mill-turn" obradni centri); i (4) proizvodi koji imaju hibridnu strukturu ili funkciju (npr. metalno plastični kompozitni dijelovi). Takva tehnologija je dobro prilagođena za maloserijsku proizvodnju novih, teškoobradivih materijala u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, automobilske industriji, energetske sektoru, industriji nafte i plina i mnogim drugim.

Postoji mnogo hibridnih proizvodnih postupaka, a prema [2] se mogu podijeliti u nekoliko skupina:

1. kombinacija tehnologija obrade odvajanjem čestica (ooč): - konvencionalni postupak obrade odvajanjem i ECM postupak, konvencionalni postupak obrade odvajanjem i EDM postupak, konvencionalni postupak obrade odvajanjem i lasersko rezanje, lasersko rezanje i EDM, lasersko rezanje i ECM, EDM i ECM postupci, ultrazvučni konvencionalni postupci obrade (brušenje, glodanje, bušenje, tokarenje)
2. kombinacija tehnologija preoblikovanja: oblikovanje lima, laserska toplinska obrada i oblikovanje lima
3. kombinacija aditivnih tehnologija
4. kombinacija aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem čestica: zavarivanje i obrada odvajanjem čestica, lasersko oblaganje i obrada odvajanjem čestica, elektroformiranje i poliranje, i drugi
5. kombinacija tehnologija spajanja i obrade odvajanjem čestica
6. kombinacija aditivnih tehnologija i tehnologija preoblikovanja
7. kombinacija tehnologija obrade odvajanjem čestica i preoblikovanja: termički poboljšana obrada odvajanjem čestica, laserski asistirano rezanje vodenim mlazom, kriogena obrada, brušenje i očvršćenje, i mnogi drugi

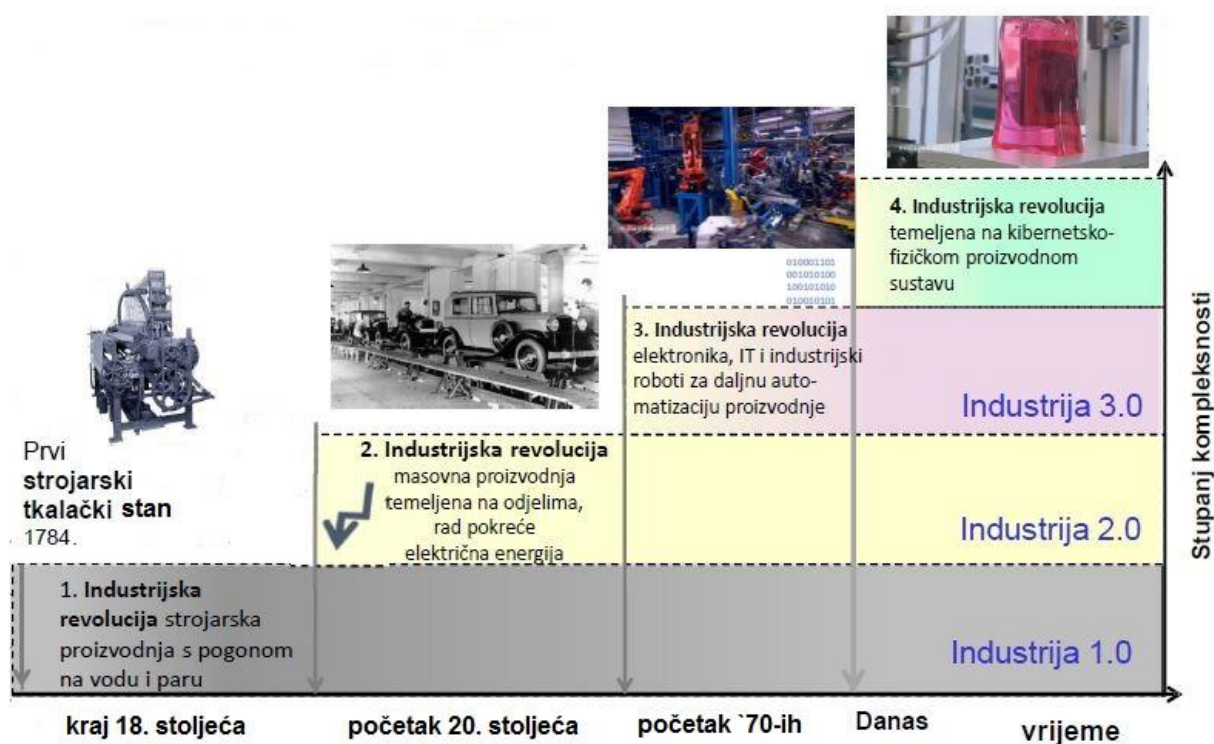
Hibridni proizvodni postupak u kombinaciji aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem čestica jedna je od novije razvijenijih tehnologija koja će zbog svojih prednosti i mogućnosti imati veliki značaj u budućoj industrijskoj proizvodnji, te u nadolazećoj industrijskoj revoluciji. Aditivnom tehnologijom, pomoću laserskog oblaganja izrađuje se približno gotovi željeni oblik obratka, te se potom postupkom obrade odvajanjem čestica isti taj obradak obrađuje do završnog oblika sa zahtjevanim točnostima i kvalitetom.

Ultrazvučna obrada odvajanjem čestica jedna je od poznatije hibridne tehnologije. Temelji se na istovremenoj primjeni obrade odvajanjem čestica sa rotacijom glavnog vretena, i ultrazvučne vibracije sa visokofrekventnom aksijalnom oscilacijom reznog alata ili obratka.

Navedene hibridne tehnologije detaljnije su opisane u nastavku rada, sa dostupnim izvedbama hibridnih alatnih strojeva, njihovim karakteristikama, načinom rada te područjima primjene u industriji.

2. INDUSTRIJA 4.0

Industrija 4.0 je izraz koji označava četvrtu industrijsku revoluciju, pokrenutu od strane njemačke industrije. Ona predstavlja strateški pristup povezivanja sustava i uređaja baziranih na internet tehnologiji koji ima za cilj uspostaviti komunikaciju između ljudi, strojeva, proizvoda, proizvodnih i poslovnih sustava, Slika 1. Prve tri industrijske revolucije rezultat su uvođenja strojeva, električne energije i informacijske tehnologije. Sada, uvođenje Interneta 'stvari i usluga' (eng. "IoT-Internet of Things" i "IoS-Internet of Services") u proizvodnju pokreće četvrtu industrijsku revoluciju.

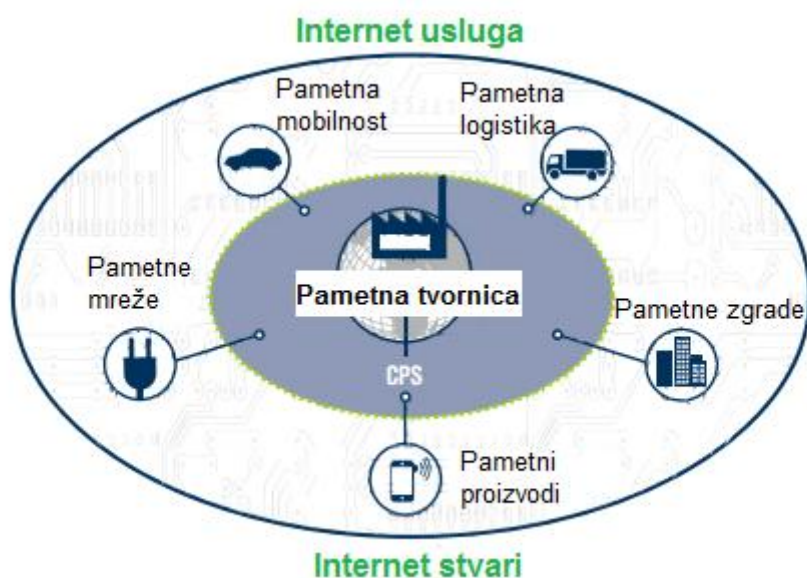


Slika 1. Razvoj industrijskih revolucija kroz povijest [3]

Prema [4] uspostaviti će se globalne mreže koje će obuhvaćati strojeve, te proizvodne i skladišne objekte u formu virtualno-fizičnog sustava (eng. CPS, Cyber-Physical System). Oni će biti sposobni samostalno komunicirati, međusobno se pokretati i kontrolirati, olakšavajući tako fundamentalna poboljšanja u dizajnu, proizvodnji, distribuciji i eksploataciji. Snažan razvoj informatičkih i komunikacijskih tehnologija (ICT) uvelike je doprinio pokretanju Industrije 4.0, tj. dostupnost

informacija bilo gdje, u bilo koje vrijeme, s bilo kojim sadržajem. Digitalizacija budućnosti jedan je od glavnih megatrendova prisutnih u suvremenom svijetu.

Ovaj novi tip industrije utemeljen je na modelu "Pametne" tvornice, Slika 2. Ugradbeni proizvodni sustavi su vertikalno umreženi s poslovnim procesima drugih poduzeća i horizontalno povezani s prostorno raspršenim mrežama koje dodaju vrijednost. Pametne tvornice omogućavaju ispunjavanje želja kupaca, pa je moguće da i proizvodnja jedno-komadnih proizvoda bude profitabilna. Kod Industrije 4.0, dinamični poslovni i inženjerski procesi omogućuju izmjene u proizvodnji u 'zadnji čas' imajući npr. mogućnost fleksibilnosti s obzirom na poremećaje i pogreške od strane dobavljača.



Slika 2. Koncept „pametne „ tvornice [4]

Industrija 4.0 i pametna tvornica uklapaju se u internet stvari i usluga, te se povezuju s ostalim pametnim tehnologijama. Pametne tvornice su prema [4], umreženi globalni sustavi na mikrorazini s novim proizvodnim tehnologijama, novim materijalima i sustavima za obradu i pohranu podataka. S druge strane, pametni proizvodi znaju svoju povijest, trenutni status i alternativne pravce da dođu do željenog stanja, tj. znaju kako su proizvedeni i kako trebaju biti korišteni. Javlja se personaliziranost proizvoda, njihova lokalna proizvodnja, fleksibilnost uz nisku cijenu, te korištenje aditivnih tehnologija.

Učinci Industrije 4.0 prema literaturi [3] su sljedeći:

- a) upravljanje kvalitetom podržano velikom bazom podataka ("Big data") - algoritmi temeljeni na podacima iz prošlog razdoblja identificiraju problem kvalitete i smanjuju greške proizvoda
- b) proizvodnja podržana robotima - fleksibilni, humanoidni roboti obavljaju poslove, kao što je montaža i pakiranje
- c) autonomna logistička vozila - potpuno automatizirani transportni sustavi sami inteligentno voze unutar tvornice
- d) simulacija proizvodne linije - novi softveri omogućavaju simulaciju i optimizaciju montažne i proizvodne linije
- e) pametna mreža dobavljača - monitoring cjelokupne mreže dobavljača omogućuje bolje donošenje odluka za opskrbu
- f) prediktivno (preventivno) održavanje - daljinski nadzor opreme omogućuje zamjenu dijelova/modula prije kvara
- g) strojevi kao usluga - proizvođači prodaju ne samo strojeve, nego i usluge korištenja i održavanja
- h) samoorganizirajuća proizvodnja - automatski koordinirani strojevi optimiziraju svoju iskoristivost i izlaz (output)
- i) Aditivna proizvodnja kompleksnih proizvoda - 3D pisači stvaraju kompleksne dijelove u jednom koraku, kao i druge izvedbe aditivnih tehnologija
- j) rad, održavanje i usluge s proširenom stvarnošću - četvrta dimenzija omogućava operativno vođenje, pomoć na daljinu i dokumentiranje

Industrija 4.0 će transformirati industrijsku radnu snagu do 2025. godine. Primjer istraživanja u Njemačkoj prema [3], je pokazao da će uvođenjem digitalnih industrijskih tehnologija trebati više radnih mjesta nego što će se izgubiti, ali radna mjesta će zahtijevati značajno različite vještine radnika. Tehnologija će pomoći ljudima da, uz dodatne kvalifikacije i obrazovanja, ostanu na radnim mjestima ili ih napuste. Detaljno modeliranje prognozira povećanje od oko 350000 radnih mjesta u Njemačkoj do 2025.godine. Veća uporaba robotike i informatizacije će se smanjiti za približno 610000 radnih mjesta u montaži i proizvodnji. No, ovo smanjenje će biti više

nego kompenzirano stvaranjem oko 960000 novih radnih mjesta, posebice u području ICT-a i znanosti o podacima - *data science*.

Hibridni alatni strojevi će također zauzeti svoje mjesto u omogućavanju i realizaciji Industrije 4.0. sa svojom fleksibilnošću, kombiniranim aditivnim tehnologijama, većom učinkovitošću, autonomnim radom, bržom i kvalitetnijom izradom obradaka, pogotovo kompleksnih geometrija, te kvalitetnijom obradom novih, teškoobradivih materijala koji su sve više zastupljeniji u modernoj industrijskoj proizvodnji. Također, hibridni alatni strojevi s poboljšanim kontrolnim sustavima, i integriranim inteligentnim sustavima za upravljanje, biti će pogodni za digitalizaciju i međusobno povezivanje s ostalnim tehnološkim sustavima. Potreban moderni operacijski sustav je razvila i tvrtka DMG MORI pod nazivom „Celos” koji obrađuje veliku bazu podataka unutar i izvan kompanije, te također automatizirane sustave potrebne za autonoman rad putem internetske mreže. Takav moderni kontrolni sustav „Celos” omogućuje pametnije i brže međusobno povezivanje između tvornica i ureda, kao i između obradnih strojeva i drugih tehnoloških sučelja.

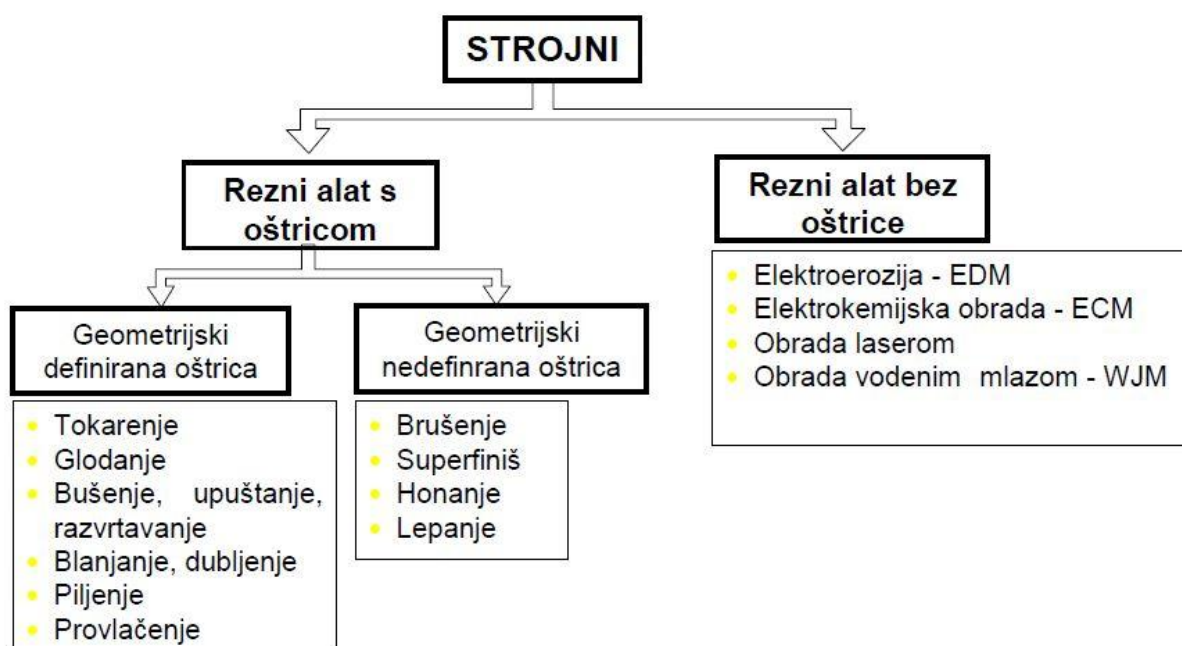
3. ADITIVNA TEHNOLOGIJA I OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA

Suvremeni postupci aditivne proizvodnje se razvijaju i primjenjuju od druge polovine 80-ih godina prošlog stoljeća. Takva tehnologija se pojavila zbog sve strožih suvremenih zahtjeva tržišta kao što su povišenje kvalitete proizvoda, fleksibilnost proizvodnje, sniženje troškova i skraćanje vremena razvoja i proizvodnje. Dodatni trend koje je sve uočljiviji u pojedinim segmentima tržišta je napuštanje masovne proizvodnje u korist maloserijske, a vrlo često i pojedinačne (personalizirane) proizvodnje. Glavna značajka aditivnih postupaka je, prema [5], dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade cijele tvorevine. Takvo načelo proizvodnje omogućuje pravljenje vrlo komplicirane geometrije proizvoda koju bi drugim, klasičnim postupcima proizvodnje bilo vrlo teško ili nemoguće načiniti. Iako se postupcima aditivne proizvodnje grade vrlo komplicirani geometrijski 3D oblici proizvoda, načelno je riječ o 2½D postupcima pri kojima se 2D slojevi slažu jedan na drugi i tako se dolazi do treće dimenzije proizvoda. Dodatna je značajka aditivnih postupaka da se u načelu proizvodi izravno na opremi za aditivne postupke na osnovi 3D računalnog modela proizvoda, bez potrebe za dodatnim alatima. Aditivnu proizvodnju (eng. Additive Manufacturing – AM) moguće je ostvariti na tri načina: postupcima brze proizvodnje prototipova (eng. Rapid Prototyping – RP), postupcima brze proizvodnje alata i kalupa (eng. Rapid Tooling – RT) i postupcima brze (izravne) proizvodnje (eng. Rapid Manufacturing – RM). Postupci aditivne proizvodnje polimernih proizvoda obilježili su početke razvoja u tom području, a važniji takvi postupci su: stereolitografija, selektivno lasersko srašćivanje, 3D tiskanje, slojevita izrada laminiranjem, i drugi. S vremenom su se razvili i postupci za proizvodnju proizvoda koji nisu isključivo od polimerih materijala, već su mješavine polimera i metala, mješavine metala, čisti metali, te novih, naprednih materijala. Izravna aditivna proizvodnja alata, metalnih i drugih materijala dijeli se na nekoliko tipova postupaka, u koje spadaju i izravno taloženje metala, izravno taloženje metalnog praha. Navedeni postupci se temelje na istom principu rada kao i postupak laserskog oblaganja (eng. Laser Deposition Welding) koji će kasnije biti opisan u radu, u postupku hibridne proizvodnje laserskog oblaganja i obrade odvajanjem čestica. Postupak izravnog taloženje metala (eng. Laser Engineering Net Shaping-LENS)

temelji se na načelu taloženja, odnosno navarivanja. Proces započinje djelovanjem laserske zrake na vrlo usko područje površine, pri čemu nastaje lokalno rastaljeno područje. S pomoću mlaznice se zatim dodaje točno određena količina novog materijala (u praškastom stanju), pri čemu nastaje novi sloj metalnog proizvoda, Slika 8. Postupak se odvija u podtlačnoj komori, u koju se lako mogu kontrolirati uvjeti izrade metalnog proizvoda. Postupak izravnog taloženja metalnog praha (eng. Direct Metal Deposition – DMD) sličan je LENS postupku. Razlike su uglavnom u detaljima vezanim za upravljanje i uporabu uređaja za izradu metalnih proizvoda. DMD postupak nudi prednosti izrade proizvoda od više materijala te izrade kanala za temperiranje na optimalnim položajima.

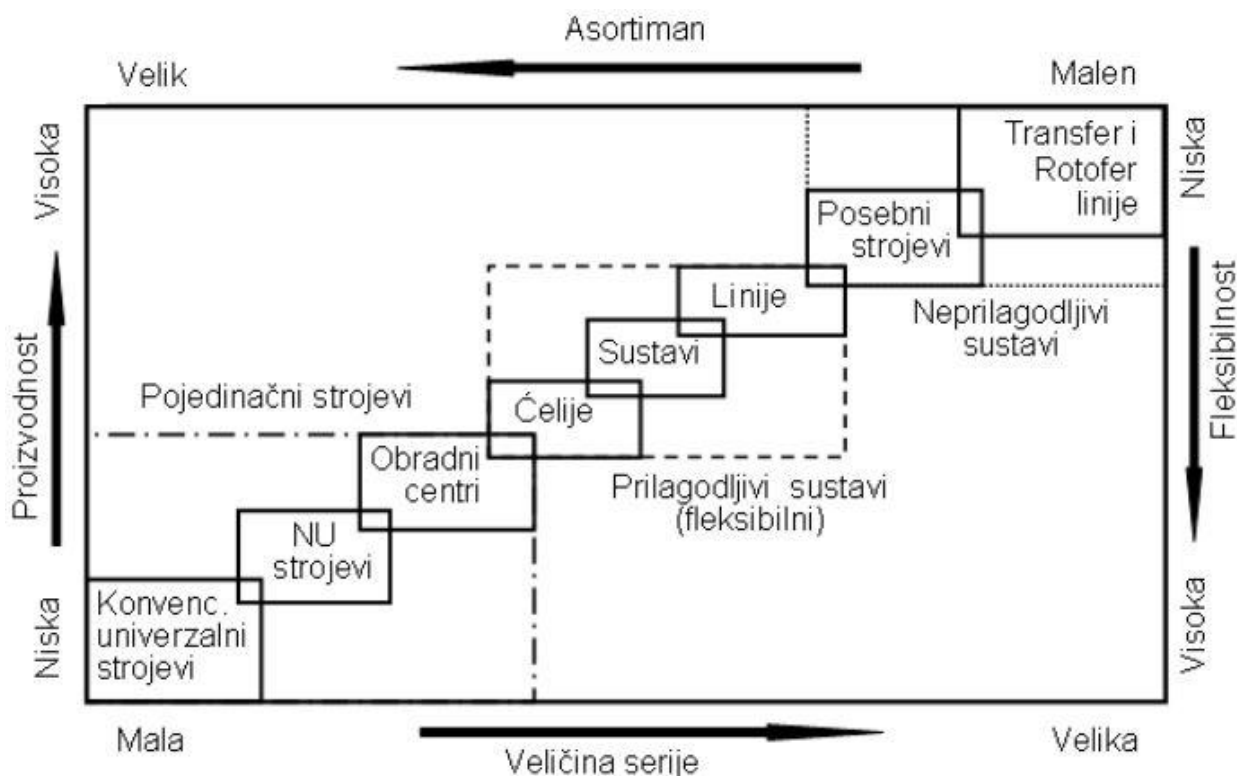
Strojna obrada se dijeli na strojnu obradu odvajanjem čestica i strojnu obradu bez odvajanja čestica. Strojna obrada odvajanjem čestica se obavlja na alatnom stroju s unaprijed određenim alatima, kako bi se u što kraćem vremenu dobio proizvod zadovoljavajuće kvalitete. S pogleda procesa obrade, kao procesa koji omogućava transformaciju predmeta obrade od priprema do gotovog proizvoda (izratka), tehnologija obrade odvajanjem čestica je dobila naziv baš zbog toga što se transformacija odvija na način da se konačan oblik izratka dobije skidanjem odvojenih čestica s početnog komada materijala (priprema ili sirovac). Postupci obrade odvajanjem čestica se dijele na ručno i strojno obavljane postupke. Ručni postupci su postupci raznim ručnim alatima, turpijanje, bušenje, piljenje, dok strojne postupke dijelimo na postupke s reznim alatom s oštricom i reznim alatom bez oštrice, te je prikazana njihova podjela, Slika 3. Prednosti obrade odvajanjem čestica su sljedeće:

- jedini način da se ostvari visoka preciznost i visoka kvaliteta obrađene površine
- jedini način formiranja oštih rubova, ravnih površina, te unutarnjih i vanjskih profila
- jedini način oblikovanja otvrdnutih i krutih materijala
- ekonomičnost
- presudna je kod formiranja složenih oblika sa zahtjevnom dimenzijskom točnošću i površinskom hrapavošću.



Slika 3. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [6]

Obradni (alatni strojevi) su svi strojevi koji služe za obradu i izradu pojedinih dijelova svih ostalih strojeva i uređaja. Obradni strojevi su jedini strojevi koji mogu izrađivati sami sebe. Omogućuju međusobno gibanje između reznog alata i obratka te daju energiju potrebnu za odvijanje procesa. Osim toga, na obradnim strojevima se ostvaruje zadani oblik izratka, potrebna točnost i dimenzija izratka, potrebna hrapavost obrađene površine te dobra kakvoća površinskog sloja. Prva podjela obradnih strojeva je podjela prema postupcima obrade odvajanjem čestica, pri čemu dobivaju istoimene nazive. (npr. tokarenje – tokarilica, glodanje – glodalica, brušenje – brusilice, itd.). Slijedi podjela prema načinu upravljanja, a to su: ručno upravljani i automatsko upravljani. Također, obradni strojevi se mogu podijeliti prema tehnološkom prostoru koji je određen s nekoliko faktora: veličinom serije, proizvodnošću, asortimanom proizvoda i fleksibilnošću. S obzirom na ove faktore, prikazane su izvedbe alatnih strojeva, Slika 4.



Slika 4. Izvedbe alatnih strojeva [7]

Izvedbe hibridnih alatnih strojeva koje će biti opisane u nastavku rada, predstavljaju obradne centre s integriranim dodatnim tehnologijama u jednoj izvedbi, obradnoj platformi. Obradni centar, ili osnovna fleksibilna obradna jedinica, odnosno obradni modul je prema [7], numerički upravljani alatni stroj kojemu može biti dodana automatska izmjena alata, odnosno pribora, automatska izmjena obratka, odnosno palete, te u automatskom ciklusu i jednom stezanju obrađuje sve slobodne površine obradaka. Obradni centar je osnovni modul fleksibilne obradne ćelije ili sustava, koji može raditi samostalno ili u sustavu. Ovisno o opremljenosti, obradni centar može raditi djelomično bez nazočnosti operatera, osobito ako mu je pridodano spremište paleta.

4. HIBRIDNA TEHNOLOGIJA LASERSKOG OBLAGANJA I GLODANJA

Jedinstvena kombinacija postupka laserskog oblaganja sa sapnicom za doziranje praha i kasnije postupka glodanja, inovativna je hibridna metoda obrade. Takva hibridna tehnologija, prema [8], omogućuje bržu izradu dijelova kompleksnih geometrija i pojedinačnih 3D dijelova. Posebno velike komponente do 500 mm u promjeru mogu biti izrađene na isplativiji način ovim hibridnim rješenjem. Fleksibilna izmjena između laserskog oblaganja i obrade glodanjem omogućuje izravnu obradu nekog područja do kojeg se više ne može doseći na gotovom komadu. Laserski postupak se temelji na doziranju metalnog praha, koji omogućuje aditivnu proizvodnju dijelova bez obradne komore ni potrebe korištenja potpornih konstrukcija. Aditivna izrada je do deset puta brža nego izrada u kalupu. Po prvi puta, tvrtka DMG MORI je integrirala laserku aditivnu tehnologiju unutar visokotehnološkog 5-osnog obradnog centra. Tvrtka DMG MORI nudi cjelokupni izradbeni lanac, počevši sa NC programiranjem u CAD/CAM sustavu za hibridne tehnologije, korištenjem tehnoloških parametara dobivenih iz baze podataka materijala, obradnim postupcima, praćenjem procesa te tehničkom dokumentacijom. Tvrtka je razvila cijelu seriju hibridnih alatnih strojeva sa laserskom tehnologijom pod nazivom LASERTEC tehnologija. Uz navedenu aditivnu tehnologiju, postoje još nekoliko kombiniranih izvedbi kao što su laserska visokoprecizna obrada, lasersko bušenje.



Slika 5. Tehnološki centri aditivne proizvodnje tvrtke DMG MORI [8]

Tvrtka DMG MORI jedna je od vodećih tvrtki u proizvodnji alatnih strojeva. Posebno su poznati po svojim inovativnim rješenjima, svakodnevnim razvijanjem i istraživanjem novih tehnologija, što im omogućuje veliku konkurentnost na tržištu. Tako su i tehnologiju aditivne proizvodnje proširili na svjetsko tržište preko svoja četiri tehnološka centra za aditivnu proizvodnju, a to su Pfronten (Njemačka), Chicago (SAD), Tokyo (Japan) i Singapore (Singapur), Slika 5. To im omogućuje ponudu svojih proizvoda kupcima na lokalnim razinama, u područjima razvoja tehnologije i materijala sa mogućom obradom ispitnih dijelova te raznim praktičnim primjerima.

Tvrtka Mazak, još jedna od vodećih tvrtki u proizvodnji alatnih strojeva, također je razvila hibridne višenamjenske alatne strojeve u kombinaciji aditivne tehnologije i tehnologije obrade odvajanjem. Ona predvodi u području tehnologija koje pružaju cjelokupnu obradu dijelova u jednom stezanju, tzv. „Done-in-One” proizvodnju.

4.1. Izvedbe hibridnih alatnih strojeva

Mnoge tvrtke u području industrijske proizvodnje alatnih strojeva razvijaju i proizvode nove hibridne izvedbe alatnih strojeva. Od mnogih drugih, u ovom radu su izdvojene izvedbe hibridnih alatnih strojeva, s tehnologijom laserskog oblaganja i glodanja na jednom mjestu, od tvrtke DMG MORI i tvrtke Mazak. Izvedba hibridnog alatnog stroja tvrtke DMG MORI, koji će biti opisan u nastavku rada, je stroj pod nazivom „Lasertec 65 3D“, dok je predstavnik tvrtke Mazak hibridni alatni stroj pod nazivom „Integrex i-400 AM“.

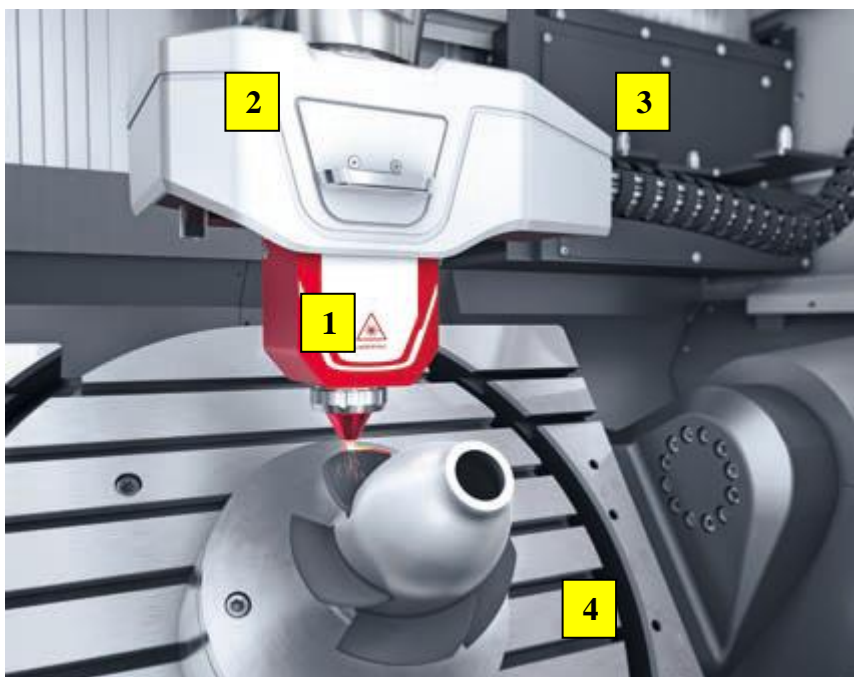
4.1.1. Lasertec 65 3D

Predstavnik LASERTEC tehnologije tvrtke DMG MORI, u kombinaciji sa aditivnom tehnologijom i tehnologijom obrade odvajanjem čestica je hibridni alatni stroj "Lasertec 65 3D", Slika 6.



Slika 6. Hibridni alatni stroj Lasertec 65 3D [8]

Potpuno neovisni 5-osni obradni centar sa vrlo stabilnom konstrukcijom zauzima manje od 12 m² radne površine. Karakterizira ju potpuno automatizirana izmjena laserske obrade sa glodanjem preko HSK sučelja, što je prikazano sa ostalim značajkama stroja, Slika 7. Prema literaturi [8], stroj posjeduje dosta veliki obradni prostor za obratke veličina do 500 mm u promjeru, visine 400 mm i težine obradaka do 600 kg. Maksimalna brzina vrtnje glavnog vretena iznosi 18 000 min⁻¹. Ergonomski konstruirano, ima vrata veličine 1430 mm za odličnu pristupačnost i rukovanje sprijeda. Konstruiranje i programiranje obradaka obavlja se u SIEMENS NX softverskom paketu. Kontroliranje proizvodnog postupka i reguliranje laserskog medija obavlja se preko integriranog optičkog ekrana.

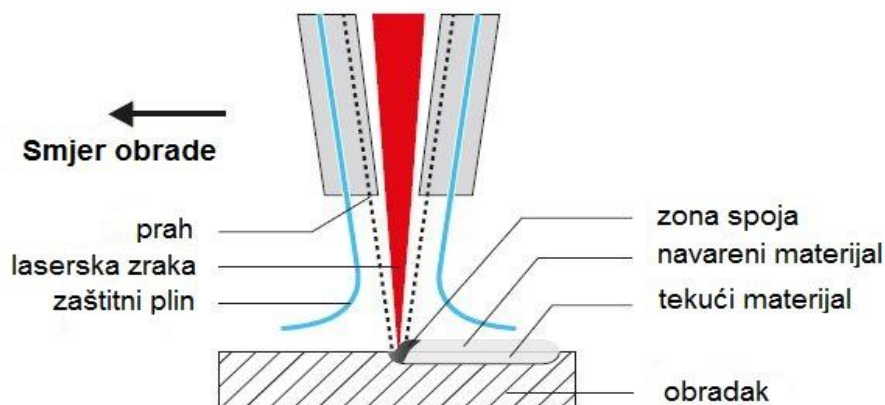


Slika 7. Značajke hibridnog alatnog stroja „Lasertec 65 3D“ [8]

Slika 7. prikazuje značajke hibridnog alatnog stroja „Lasertec 65 3D“, a njegovi osnovni moduli su:

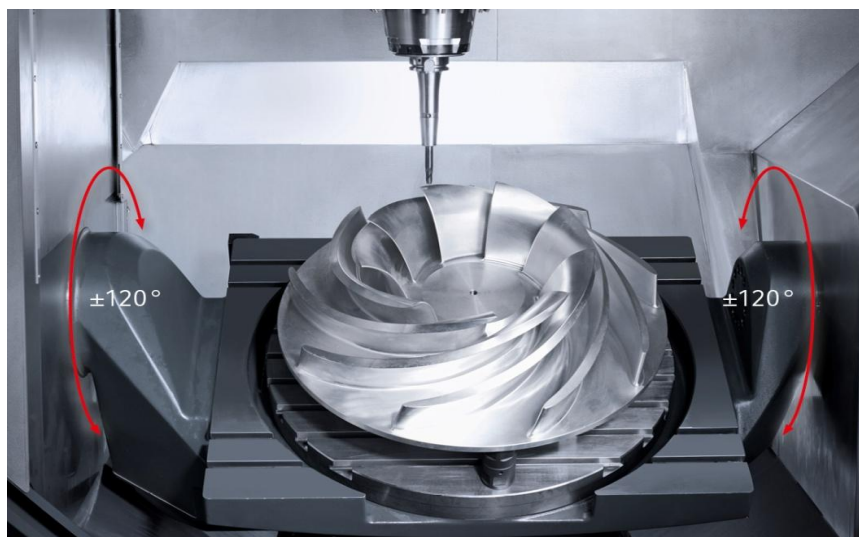
1. lasersko oblaganje laserskom diodom snage 2kW sa prahom;
2. fleksibilna izvedba laserske glave preko HSK sučelja;
3. potpuno automatizirana izmjena laserske glave;
4. okretno nagibni stol za 5-osnu simultanu obradu

Princip rada hibridnog alatnog stroja „Lasertec 65 3D“, tj. postupak laserskog oblaganja, Slika 8., temelji se na korištenju koaksijalne sapnice pri čemu se metalni prah dozira u slojevima na osnovni materijal (neporozno i taljenje bez pukotina). Laserskom zrakom se formira bazen rastaljenog materijala na metalnoj podlozi, u koji se dozira prah. Prah se tali da bi se formirala obloga koja je fuzijski vezana na podlogu. Tako je metalni prah spojen jako čvrstom vezom za površinu. Zaštitni plin sapnice štiti od oksidacije tijekom postupka oblaganja.



Slika 8. Postupak laserskog oblaganja [8]

Nakon hlađenja metalni slojevi se mogu mehanički obrađivati, simultanim 5-osnim glodanjem. Tijekom obrade glodanjem, laserska glava se nalazi izvan radnog prostora te je tako zaštićena od prašine, sredstva za hlađenje i odvojenih čestica. 5-osna obrada se sastoji od 3 translacijske osi X,Y i Z, te druge dvije su pridružene okretno-nagibnom stolu. Rotacija oko osi C za 360° i nagibi oko osi A $\pm 120^\circ$, Slika 9.



Slika 9. Postupak 5-osnog glodanja s okretno-nagibnim stolom [9]

Opisani hibridni alatni stroj s navedenom tehnologijom ima široko područje primjene u industriji, Slika 10. , a to su a) namjena izrade, b) popravak te c) prevlačenje dijelova/komponenta. Prema literaturi [8] hibridni alatni stroj „Lasertec 65 3D”, s cjelokupnom proizvodnjom dijelova može se upotrijebiti u zrakoplovnoj i

svemirskoj industriji, a kao primjer može se navesti izrada kućišta turbine. Također se upotrebljava u strojarstvu kod izrade raznih dijelova kao što su mlaznice, u vakuumskoj tehnologiji za izradu rashladnih cijevi, te kod izrade kalupa za rashladne elemente. Jedna od namjena je također, popravak visoko vrijednih oštećenih ili istrošenih čeličnih dijelova na jednom stroju. Za popravak takvih dijelova može se upotrijebiti također u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji za popravak rotora lopatica, u energetici za popravak pelton turbine i impelera, te u izradi kalupa za popravak injekcijski prešanog kalupa. Za prevlačenje dijelova prevlakama koristi se u industriji nafte i plina kod prevlačenja glave svrdla za bušenje, u strojarstvu za prevlačenje ležajnih blokova, pogonskih osovina, te prevlačenje prirubnica u vakuumskoj tehnologiji.



Slika 10. Primjeri namjene hibridnih alatnih strojeva [8]

Vrste materijala koji su ispitani i pogodni za obradu ovakvom metodom su:

- nehrđajući čelik
- niklove legure (Inconel 625, 718)
- kompoziti sa volfram karbidnom matricom
- brončane i mjedene legure, aluminij i aluminijske legure
- krom-kobalt-molibden legure
- alatni čelik

Slika 11. i Tablica 1. prikazuju praktični primjer kompletne izrade 3D obratka, kućišta turbine, navedenih dimenzija, vrste materijala te vremenima trajanja pojedinih postupaka obrade:

Obradak: kućište turbine

Materijal: nehrđajući čelik

Lasersko oblaganje: 230 minuta

Glodanje: 76 minuta

Dimenzije: Ø 180mm x 150mm



Slika 11. Kućište turbine

Tablica 1. prikazuje redoslijed postupaka obrade kućišta dijelova, i to postupcima laserskog oblaganja s pripadajućim opisom obrade crne boje, i postupcima glodanja s pripadajućim opisom obrade plave boje.

Tablica 1. Redoslijed postupaka obrada kućišta turbine [10]

<div data-bbox="233 1043 319 1115" style="display: inline-block; width: 50px; height: 30px; border: 1px solid black; margin-right: 10px;"></div> <div data-bbox="355 1061 636 1097" style="display: inline-block;">Lasersko oblaganje</div>	<div data-bbox="871 1043 954 1115" style="display: inline-block; width: 50px; height: 30px; background-color: #4a86e8; margin-right: 10px;"></div> <div data-bbox="1046 1061 1177 1097" style="display: inline-block; color: #4a86e8;">Glodanje</div>
<div data-bbox="292 1193 699 1478" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="236 1496 758 1534" style="text-align: center;">1: osnovna izrada cilindričnog plašta</div>	<div data-bbox="911 1193 1307 1478" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="882 1496 1340 1534" style="text-align: center;">2: rotirano za 90°: izrada rubova</div>
<div data-bbox="292 1608 699 1888" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="255 1906 738 1980" style="text-align: center;">3: rotirano za 90°: glodanje ravnih površina i vanjske konture</div>	<div data-bbox="916 1608 1302 1888" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="837 1906 1385 1944" style="text-align: center;">4: izrada provrta po rubu za prirubnicu</div>



5: nastavak izrade cilindričnog plašta



6: izrada prijelaza na konusni dio



7: laserska izrada koničnog ljevka



8: izrada drugog ruba



9: izrada 12 konektora



10: glodanje konektora



11: glodanje ruba i vanjske konture

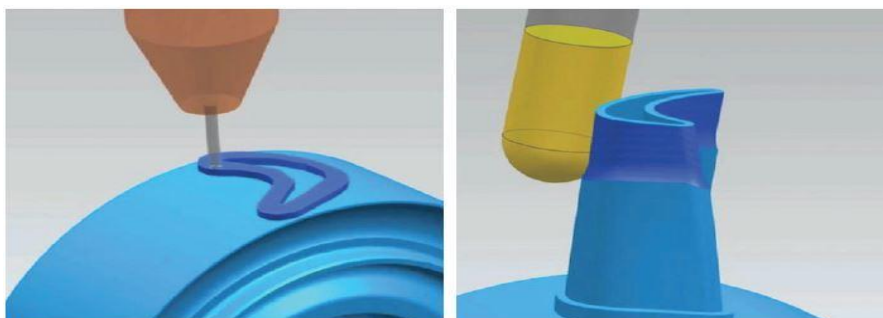


12: glodanje unutarnjih kružnih džepova

Za kompletni proizvodni postupak potreban je samo jedan programski paket, CAD/CAM sustav za hibridne alatne strojeve koji uključuje konstrukciju, programiranje i simulaciju, prema [8]. Obradak se može izraditi u samo nekoliko koraka, sa kombiniranom laserskom obradom i glodanjem u samo jednom stezanju. Proizvodni postupak se sastoji od nekoliko bitnih koraka od same konstrukcije do gotovog proizvoda, a to su:

1. CAD/CAM podaci od kupca; podjela aditivnih i subtraktivnih područja obrade; razdvajanje pojedinih presjeka dijelova
2. generiranje NC-kodova za laserski proces i glodanje u postprocesoru
3. 3D simulacija za sprečavanje od kolizije s obzirom na integriranu lasersku glavu
4. kombinirana obrada laserskim oblaganjem i glodanjem na stroju LASERTEC 65 3D; izrada komada uz fleksibilnu izmjena obradnih postupaka u jednom stezanju
5. gotovi proizvod spreman za kontrolu kvalitete

SIEMENS NX softverski paket pruža podršku novoj hibridnoj tehnologiji. Prema literaturi [11] takvo rješenje obuhvaća paket jedinstvenih sposobnosti preko računalno podržanog konstruiranja (eng. CAD- Computer aided Desing) i računalno podržane proizvodnje (eng. CAM - Computer Aided Manufacturing) koji omogućuje razvoj programa za nove hibridne alatne strojeve tvrtke DMG MORI. Model obratka za NX CAM sada podržava korake i za aditivnu obradu i za obradu odvajanjem čestica, Slika 12. Hibridni aditivni postupci mogu se pomiješati sa postupcima obrade odvajanjem, stoga model obratka mora imati mogućnost prikazati novo nanešeni materijal sa sapnicom kao i odvojenu česticu materijala sa strojnom obradom.



Slika 12. Računalni model obratka za aditivne postupke i obrade odvajanjem čestica [11]

Programiranje glave za lasersko oblaganje podrazumjeva rezanje oblika na komade i gradnja putanje gibanja za svaki sloj. To zvuči dosta slično pristupu grube obrade u NC CAM obradi glodanja, ali programiranje putanja za aditivne procese se bitno razlikuje od programiranja putanja reznih alata.

4.1.2. Integrex i-400 AM

Tvrtka Mazak također je razvila hibridne višenamjenske alatne strojeve koji omogućuju kombiniranu obradu aditivnim postupcima i postupcima obrade odvajanjem čestica na jednom mjestu, a kao njihov predstavnik bit će opisan hibridni alatni stroj „Integrex i-400 AM”, Slika 13. Na već postojeće tokarske i obradne centre dodatno je integrirana tehnologija laserskog taloženja metalnog praha.



Slika 13. Hibridni višenamjenski alatni stroj Integrex i-400 AM [12]

Razvijeni hibridni alatni stroj prema [12], kao platforma CNC obrade odvajanjem čestica, omogućuje također 5-osnu obradu koja se sastoji od 3 translacije u smjeru osi X, Y i Z, te dvije rotacijske osi C i B glavnog vretena. Stroj posjeduje i dodatno vreteno za veću produktivnost koja se omogućuje obavljanjem i sljedećih po redu operacija u jednom stezanju. Za integriranu tehnologiju laserskog taloženja metalnog praha na višeoperacijski alatni stroj, razvijene su dvije vrste laserskih glava, Slika 14.

Jedna od njih je tzv. „fina” laserska glava koja omogućuje koaksijalno lasersko oblaganje. Ona je konstruirana da uskladi dobavljenu količinu metalnog praha i snagu lasera usmjerenu, sa visokom točnošću taloženja, za izradu kompleksnih oblika sa zrcima veličine 1 mm širine i 0,5 mm visine. Druga je visokobrzinska laserska glava koja omogućuje lasersko oblaganje sa većom brzinom i većim učinkom taloženja, stvarajući zrcna veličine 3 mm širine i 1 mm visine. U slučaju laserskog taloženja praha materijala Inconel 718, stopa taloženja visokobrzinskom laserskom glavom iznosi približno 1 kg/satu. Različiti tipovi laserskih glava odabrani su prema tipovima praktične primjene, što omogućuje učinkovitiju proizvodnju proizvoda šireg opsega, nego korištenjem jedne laserske glave.

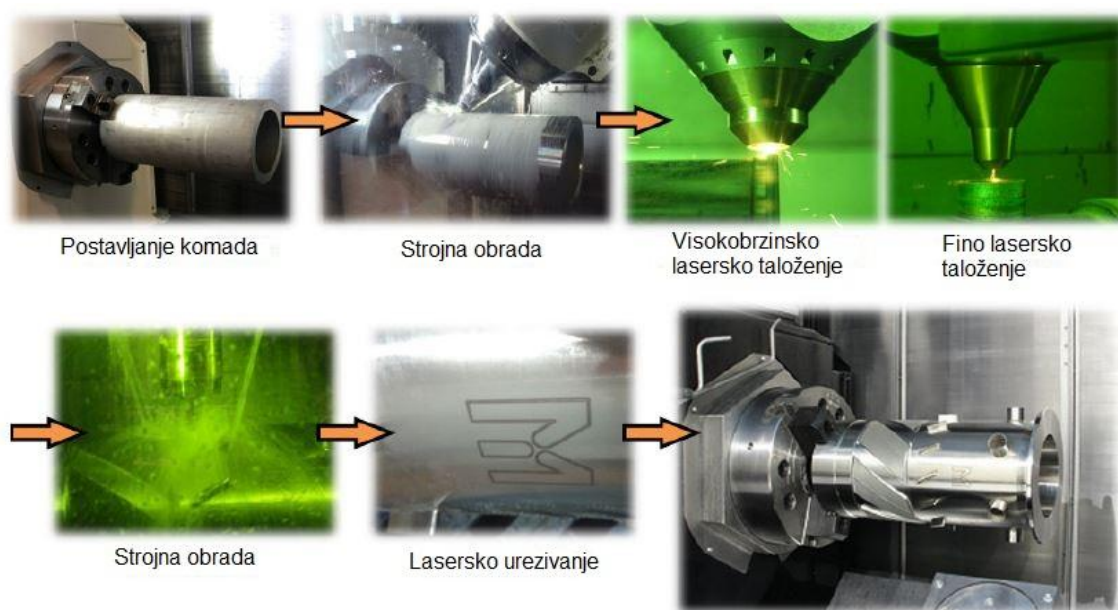


Slika 14. Dvije vrste laserskih glava [12]

Navedene laserske glave su konstruirane tako da se mogu spremati u standardno spremište alata. Glava se postavlja na glodaće vreteno sa automatskim izmjenjivačem alata. Potom, zaštitni poklopac koji predstavlja protumjeru protiv mogućih pojava kontaminacija na optičke dijelove laserske glave automatski je uklonjen i tad se glava spaja na razdjelnik. Lasersko taloženje metalnog praha je

postupak koji koristi lasersku zraku za formiranje bazena s rastaljenim materijalom na metalnoj podlozi, u koji se dozira prah, prema istom principu kao što je prikazano na Slika 8. Prah se tali da bi se stvorila obloga koja je fuzijski vezana na podlogu, a zahtjevani geometrijski oblik se izrađuje sloj po sloj.

Opisana tehnologija laserskog taloženja metalnog praha u kombinaciji sa obradom odvajanja čestica prema [12], dobro je prilagođena za maloserijsku proizvodnju teškoobradivih materijala, kao što su legure korištene u zrakoplovnoj industriji, materijala visoke tvrdoće korištenih u energetsom sektoru, te proizvodnje alata i komponenti i visokopreciznih, specijalnih legurnih konstrukcija često korištenih za proizvodnju medicinskih naprava. Iako je postupak pogodan i za izradu dijelova, i popravak i prevlačenje, najučinkovitija primjena je u prevlačenju materijala. U današnje vrijeme, postoji mnogo zahtjeva za postupcima prevlačenja materijala za potrebe industrije nafte i plina i medicinske industrije. Na temelju toga, napravljen je i prikazan praktični primjer obrade osovine motora za potrebe u industriji nafte i plina, Slika 15. Materijal podloge osovine motora je legura nehrđajućeg čelika, poznati materijal za izradu cijevi korištenih na platformama nafte zbog svojih dobrih svojstava otpornosti na koroziju uzrokovane morskom vodom. Metalni prah za taloženje je niklova legura Inconel 718 sa karakteristikama idealnim za okruženje u prisutnosti visokih temperatura, korozije i oksidacije. Promjer čestica praha je približno od 50 do 100 μm . Postupkom laserskog taloženja sa visokobrzinskom laserskom glavom i CNC obradom odvajanja čestica obrađeno je šest komada spiralnih prevlaka, dvanaest manjih lopatica i rub. Dok je šest cilindričnih ispupčenja izrađeno sa finom laserskom glavom, te logo kompanije koji je urezan na šest mjesta na obratku, pomoću fine laserske glave, ali bez metalnog praha. Navedeni primjer predstavlja izradu proizvoda sa visoko dodanom vrijednošću, poboljšanom produktivnosti i smanjenjim troškovima proizvodnje, prevlačenjem visokofunkcionalnih i različitih metalnih materijala na podlogu. Obrada aditivnim postupkom, taloženje metalnog praha traje 454 minute, dok obrada odvajanjem čestica traje 180 minuta. Nakon analize, jasno je da hibridni postupak pruža značajno smanjenje troškova materijala i potrošnju alata.



Slika 15. Praktični primjer hibridne obrade na stroju Integrex i-400 AM [12]

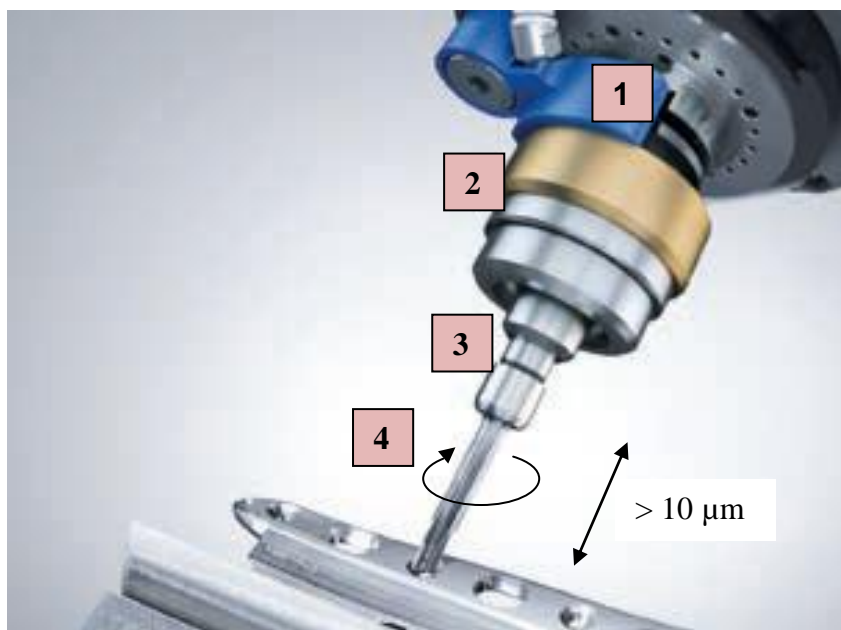
5. HIBRIDNA ULTRAZVUČNA TEHNOLOGIJA

Hibridna ultrazvučna tehnologija, koja se temelji se istovremenoj primjeni obrade odvajanjem čestica sa rotacijom glavnog vretena, i ultrazvučne vibracije sa visokofrekventnom aksijalnom oscilacijom reznog alata ili obratka, omogućuje ekonomičnu obradu komada kompleksne geometrije od visokotehnoloških materijala kao što su keramika, staklo, korund, volframov karbid te kompoziti. Prema [13], kinematičko preklapanje rotacije alata sa dodatnim osciliranjem ostvaruje smanjenje sila rezanja za čak 40% u usporedbi sa konvencionalnim obradnim postupcima. Ovisno o zahtjevima obrade komada, to omogućuje veće posmične brzine i dubine rezanja, dužu postojanost reznih alata i značajno bolju kvalitetu površine hrapavosti vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti i manje od 0,1 μm . Ovakva razvijenija hibridna ultrazvučna tehnologija može pokriti i ultrazvučno glodanje teškoobradivih metalnih legura ili vlaknima ojačanih materijala s definiranom reznom oštricom.

Princip rada hibridne ultrazvučne tehnologije temelji se na osnovnoj rotaciji alata koja se ostvaruje sa standardnim HSK držačima alata kao što su HSK-E32/ HSK-E40/ HSK-E50/ HSK-A63/ HSK-A100, te dodatnim ultrazvučnim vibracijama sa visokofrekventnom oscilacijom u aksijalnom smjeru (piezoelektrični efekt).

Tehnologija ultrazvučnog brušenja se primjenjuje u optičkoj industriji, pri obradi visokokvalitetnih keramičkih dijelova, u industriji satova, te pri kalupljenju. Također, ultrazvučno glodanje i bušenje se opet koristi u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, automobilske industriji, u proizvodnji kompozitnih dijelova, te kod održavanja, popravka te remonta kompozitnih dijelova.

Prema potrebama tržišta, usavršena je opisana ultrazvučna tehnologija za potrebe brušenja kako tvrdih tako i krhkih naprednih materijala. Uslijed kraćih izvedbi te geometrijski dizajniranih pogonskih držača alata pomoću metode konačnih elemenata, prema [13], oni sada imaju veću krutost. Optimirano induktivno transmisijsko gibanje omogućuje veće amplitude čak i iznad 10 μm , Slika 16. Na taj način, moguće je i korištenje alata s definiranom reznom oštricom, popraćeno sa svim prednostima ultrazvučne obrade. Tvrtke DMG MORI i SAUER otišle su još korak dalje te također predstavile novo područje primjene za obradu teškoobradivih metalnih materijala kao što su niklove i titanske legure te vlaknima ojačane kompozite sa ultrazvučnim glodanjem.



Slika 16. Glavne značajke ultrazvučne obrade odvajanjem čestica [13]

Slika 16. prikazuje osnovne značajke hibridne ultrazvučne tehnologije:

1. snažna ultrazvučna vibracija sa optimiranim induktivnim prijenosom
2. snažniji ultrazvučni pojačavač sa, do tri puta većim, amplitudama
3. kraći aktuator za veću krutost
4. moguća izvedba alata i sa nedefiniranom i definiranom reznom ošticom

5.1. Izvedbe hibridnih ultrazvučnih alatnih strojeva

Mnoge tvrtke u industrijskoj proizvodnji alatnih strojeva već koriste ultrazvučnu obradu odvajanjem čestica kao jednu je od poznatije hibridne tehnologije, koju su integrirali na razne izvedbe hibridnih ultrazvučnih alatnih strojeva. Jedna od tih tvrtki je i tvrtka DMG MORI. Navedena tvrtka, uz ovakvu inovativnu ultrazvučnu tehnologiju, nudi niz vrsta hibridnih ultrazvučnih alatnih strojeva za potrebe skoro svih najbitnijih industrijskih grana, razna područja primjene, razne veličine dijelova te mogućnost obrade materijala širokog spektra. Uslijed velikog izbora strojeva moguća je obrada velikih dijelova čak i do 3000 mm u promjeru. U nastavku rada su opisana tri hibridna ultrazvučna alatna stroja tvrtke DMG MORI, pod nazivima „Ultrasonic 10“, „Ultrasonic 20 linear“ i „Ultrasonic mobileBlock“.

Glavne obilježja hibridnih ultrazvučnih alatnih strojeva tvrtke DMG MORI prema [13], su sljedeća:

- a) specijalne značajke ULTRASONIC softvera: posebni ciklusi za automatsku prilagodbu posmaka i CNC programiranja, kao i parametri za automatsko očitavanje frekvencija i amplituda, te automatsko praćenje procesa obrade.
- b) integrirani paket obrade brušenjem: strojevi ULTRASONIC 20 linear / duoBLOCK dostupni u izvedbi sa “mill-turn” tehnologijom za zahtjevane postupke unutarnjeg ili vanjskog brušenja cilindričnih oblika
- c) visokoučinkovita prerada sredstva za hlađenje: glavni moduli su hlađenje, grijanje, doziranje, filtracija i separacija
- d) ULTRASONIC HSK pogonski sustav: fleksibilna integracija u 5-osno obradne centre
- e) izvedbe 5-osnih obradnih centara: svi obradni centri dostupni u 5-osnoj izvedbi za ultrazvučno i visokobrzinsko (HSC-High Speed Cutting) glodanje kompleksnih geometrija na jednom stroju
- f) vrlo moćan kontrolni sustav

5.1.1. Ultrasonic 10

Hibridnih ultrazvučni alatni stroj “Ultrasonic 10” sa svojom kompaktnom podnom površinom od samo 2 m² nudi jedinstvene mogućnosti za dentalnu i zdravstvenu industriju, za proizvodnju mnogih implantanata i proteza sa različitim zahtjevanim svojstvima izrađenih od različitih materijala. Također, strojevi se mogu koristiti i u drugim industrijskim granama kao što su industrija satova, precizno strojarstvo te kod izrade alata i kalupa.

Ultrasonic 10 je prema [13], daleko najkompaktniji 5-osni obradni centar s integriranom ultrazvučnom tehnologijom tvrtke DMG MORI, Slika 17. Hibridni ultrazvučni alatni stroj karakterizira 5-osna simultana obrada, s brzinom vrtnje od 40000 min⁻¹, izmjenjivač alata sa spremištem za 16 alata, oprema za laserko mjerenje i kontrolu, te za mjerenje amplituda. Fleksibilna izmjena je bazirana na standardnom HSK-32 držaču alata, te također posjeduje 4-paletni sustav za automatsku izmjenu obradaka PH 214. Izmjena obratka je moguća u vremenu i manje

od 30 sekundi pomoću specijalnih hvataljki koji su smješteni na vretenu, koji omogućuje višesmjensku obradu komada bez nadzora, te bez potrebe za dodatnim prostorom. Takav sustav pruža ekonomski isplativu automatsku proizvodnju. Najbolje rješenje za višesmjenski rad strojeva omogućuje novo linearno skladište za obratke PH 2I120 SAUER.



Slika 17. Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic 10“ [13]

5.1.2. Ultrasonic 20 linear

Potpuno preuređen, novi hibridni ultrazvučni alatni stroj “Ultrasonic 20 linear” sa novim funkcionalnim dizajnom i smanjene površine od 3.5 m², posjeduje bolju krutost i dinamiku, Slika 18. Svestrana tehnička optimizacija prema [13], dovela je do veće brzine vrtnje koja sada iznosi i do 60000 min⁻¹ za visokobrzinsku obradu, optimirani “mill-turn” stol sa maksimalnom brzinom vrtnje 1500 min⁻¹ za ekonomski isplativu obradu brušenjem naprednih materijala, tj. integrirani okretno nagibni stol, do 50% učinkovitiji pogonski motori (A-os), povećana opteretljivost stola do 15 kg te korištenje većeg alata s promjerom do 50 mm.



Slika 18. Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic 20 linear“ [13]

Fleksibilna izmjena je bazirana na standardnim HSK-E32 / HSK-E40 držačima alata. Hibridni ultrazvučni alatni stroj prema [13], omogućuje ultrazvučno glodanje, brušenje i glodanje novih i naprednim materijala, te također i konvencionalne obrade, sve u jednoj izvedbi. Također posjeduje izmjenjivač alata sa spremištem za 30 alata, i to ultrazvučnih i konvencionalnih u kombinaciji, Slika 19. Nova izvedba ovog stroja je također opremljena sa inovativnim i moćnim CELOS kontrolnim sustavom sa dodatnim aplikacijama. CELOS kontrolni sustav daje vizualni prikaz najbitnijih parametara ultrazvučnih obrada: frekvencije, amplitude, izlazna snaga. Automatska izmjena obradaka sa linearnim skladištem PH 10I100 omogućuje rukovanje do čak 99 komada od skladišta do radnog prostora, a izmjena je moguća u trajanju i manje od 30 sekundi. Također, svi dostupni sustavi za stezanje na tržištu se mogu fleksibilno integrirati na hibridni alatni stroj. U svim visokotehnološkim područjima postoje konstantni zahtjevi za novim tehnološkim rješenjima i ekonomičnim obradnim postupcima za obradu teškoobradivih budućih materijala.



Slika 19. Izmjenjivač alata sa spremište za 30 alata [13]

Baš u tom području obrade teškoobradivih materijala, tvrtka Sauer je napravila značajne korake te implementirala svoju ultrazvučnu tehnologiju te zajedno sa svojom tehnološkom strukom postala vodeća u inovativnim postignućima za razvoj ultrazvučne obrade odvajanjem čestica teškoobradivih naprednih materijala. Baziran na standardnim držačima alata HSK-32 / -40 / -50 / -63 / -100, patentirani sustav ultrazvučnih aktuatora može se fleksibilno integrirati na skoro sve 5-osne obradne centre tvrtke DMG MORI.

5.1.3. Ultrasonic mobileBlock

Poslovi popravaka oštećenih kompozitnih dijelova su se do sada obavljali ručnim postupcima. U većini slučajeva, naprimjer letjelice bi se trebale dovesti natrag u hangar da bi se izvršio popravak koji zahtjeva par dana posla. Za razliku od tako dugotrajnog postupka, nova pokretna 5-osna obradna jedinka "Ultrasonic mobileBlock", Slika 20., predstavljena od tvrtke DMG MORI, omogućuje obavljanje

istog popravka u samo nekoliko minuta, sa 100%-tnom konstantnom kvalitetom, preciznošću i reproduktivnošću. Prema [13], simultana 5-osna kinematika sa integriranim okretno-nagibnim osima dozvoljava obavljanje operacija pod kutevima u rasponu od $\pm 95^\circ$. Zbog svoje lagane konstrukcije i posebno dizajniranog vakuumskog sustava, stroj se može jednostavno postaviti i prilagoditi na određene oštećene komponente. Osim za potrebe održavanja, popravaka i pregleda, stroj se može također koristiti u drugim proizvodnim procesima prilikom obavljanja zahtjevnijih proizvodnih zadataka. Moguća je obrada svih kompozitnih dijelova, te aluminijских ili magnezijских legura.



Slika 20. Hibridni ultrazvučni alatni stroj „Ultrasonic mobileBlock“ [13]

Glavne značajke stroja prema literaturi [14] su:

a) kinematika:

- snažne kinematičke karakteristike, s mogućnošću kretanja u smjerovima X, Y, Z, C i A osi
- istovremena 5-osna obrada

- vreteno visokih performansi s brzinom vrtnje do 35000 min^{-1} , nagibnom glavom u smjeru A-osi ($\pm 95^\circ$), montiranoj na vodilici u smjeru Z-osi napravljenoj od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima
- rotacija u smjeru C-osi svih 360°

b) snažna adaptacija:

- mogućnost dvostruke kutne kompenzacije uslijed prilagodljivih ručica i vakuumskih nožica s kuglastim zglobovima, Slika 21.
- posebno razvijene, promjenjive vakumske nožice, 12-16 komada
- svaka prilagodljiva ručica sa svojim ventilom
- maksimalni domet adaptacije iznosi 400mm
- samo 50% vakuumskih nožica je iskorišteno prilikom jedne adaptacije na određenu komponentu ili dio



Slika 21. Vakuumске nožice s kuglastim zglobovima [13]

c) konstrukcija male težine:

- odabrani materijali za optimizaciju težine (80 % CFRP, 15 % aluminija, 5 % alatnog čelika), približno 150 kg
- okvir, poklopac servo motora, vodilica u smjeru Z-osi, te prilagodljive ručice su napravljeni od ugljičnim vlaknima ojačanog polimera (CFRP)
- korištenje CFRP-a za sniženu toplinsku ekspanziju
- povećani faktor prigušljivosti
- jednostavno rukovanje i fleksibilna adaptacija

d) integrirano lasersko skeniranje:

- dva različita tipa lasera: točkasti i linijski skener
- optimiran za obrade CFRP-a
- točkasti laserski skener za očitavanje površine obratka u smjeru Z osi: 200 mm dometa za mjerenje
- linijski skener sa 640 pojedinih točaka za dobivanje površinskih dimenzija 3D oblika
- jednostavna montaža i demontaža u nekoliko sekundi

e) upravljanje obradom

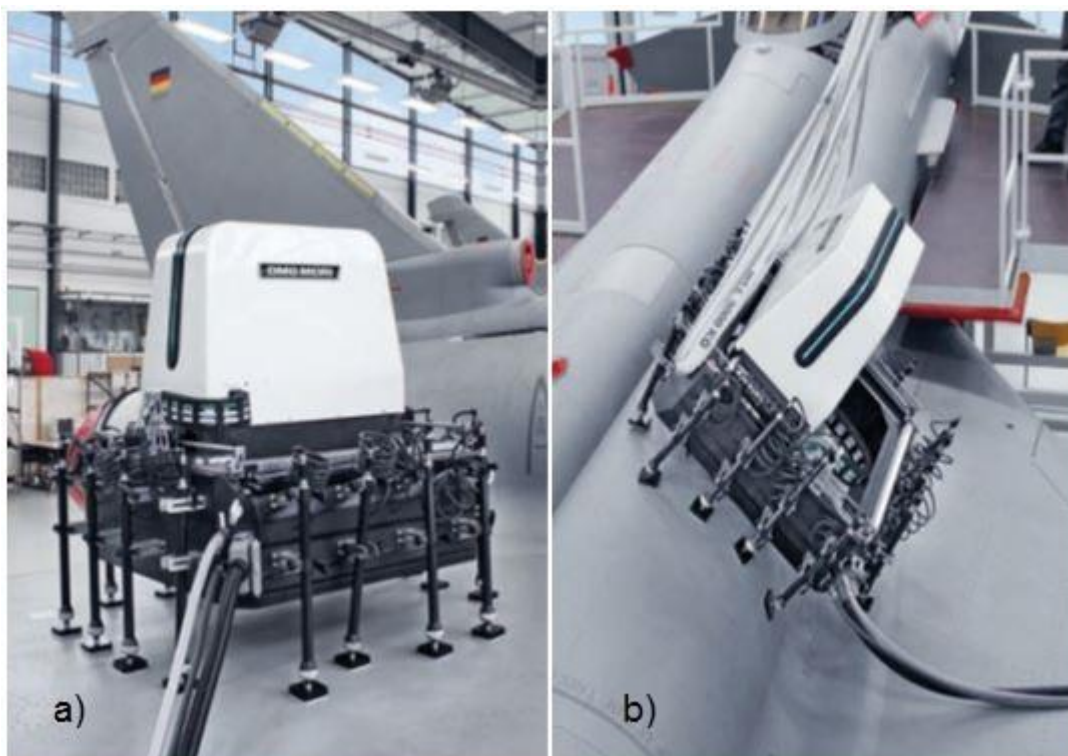
- jednostavno, računalno upravljanje sa 21-inčnim ekranom na dodir
- prilagodljivo za korištenje, počevši od tehničkih crteža, otkrivanja oštećenih dijelova i popravka istog, lasersko skeniranje površine, sve do generiranja završnih NC-datoteka
- integracija na intranet
- pristup internetskoj mreži

f) visoko dinamičan servo motor:

- moguće ubrzanje i do 7 m/s^2
- maksimalna posmična brzina 14 m/min
- visoka dinamičnost zbog malog momenta inercije
- veliki momenti u rotacijskim osima
- svi servo motori s izravnim pogonima (osim za A-os)
- homogena i usklađena konstrukcija pogona za najveću efikasnost

Slika 22. prikazuje primjer prilagođavanja hibridnog ultrazvučnog alatnog stoja „Ultrasonic mobileBlock“ na određene dijelove zrakoplova, kao mogućoj primjeni u zrakoplovnoj industriji. Fleksibilno prilagodljive vakuumske nožice prema [14], stvaraju vakuumske snagu, te se tako prilagođavaju na određeni dio. Dvanaest vakuumskih nožica se može koristiti u standardnom postupku, do 16 komada optimalno. Fleksibilni kuglični zglobovi omogućuju jednostavnu i brzo prilagođavanje na dijelove zrakoplova, Slika 22., i to pod a) na ravne površine, tj. krila zrakoplova, i

pod b) na dijelove sa zakrivljenjima i kompleksnim konturama, tj. dijelove trupa zrakoplova.



Slika 22. Prilagođavanje hibridnog ultrazvučnog alatnog stroja „Ultrasonic mobileBlock“ na dijelove zrakoplova [14]

5.2. Područje primjene

Zahtjevi tržišta se svakodnevno mjenjaju i sve su kompleksniji. Sve se više pozornosti daje novim područjima primjene, tehnološkim postupcima obrade novih materijala, koji su sve više zastupljeniji u svjetskoj industriji. Neprekidna je težnja za što boljom kvalitetom obrađenih površina, dužoj postojanosti reznog alata, povećanoj učinkovitosti i kvaliteti proizvoda pri obradu novih, naprednih materijala. Posebno zahtjevima obrade sve kompleksnijih geometrijskih oblika potrebna su učinkovita i ekonomski isplativa tehnološka rješenja. Baš u tom području prema [13], vodeća tvrtka DMG MORI sa svojom patentiranom hibridnom ultrazvučnom tehnologijom nudi najbolja rješenja. Razvili su odličnu obradnu strategiju i omogućili laganiju obradljivost svakog materijala sa određenim obradnim zadacima. Razvili su sljedeće hibridne obradne postupke: ultrazvučno brušenje, bušenje i glodanje, te njihove kombinacije.

5.2.1. Ultrazvučno brušenje


Hibridna tehnologija ultrazvučnog brušenja omogućuje ekonomičnu obradu dijelova kompleksne geometrije izrađenih od visokotehnoloških materijala kao što su keramika, staklo, korund ili kompoziti. Kinematičko preklapanje rotacije alata sa dodatnim osciliranjem ostvaruje smanjenje sila rezanja za čak 40% u usporedbi sa konvencionalnim obradnim postupcima. Ovisno o svojstvima materijala, omogućuje se izvanredna površinska hrapavost sa vrijednošću srednje aritmetičke hrapavosti i manje od 0,1 μm , izrada tankostijenih konstrukcija malih težina, dužu postojanost alata i značajno smanjenje pojave mikropukotina u materijalu.

Prednosti postupka prema [13], su sljedeće:

- smanjene sile rezanja za čak 40% u nekim slučajevima
- veći učinak skidanja čestica
- odlična kvaliteta površine, vrijednost srednje aritmetičke hrapavosti i manja od 0,1 μm
- izvodljivost tankostijenih konstrukcija, debljine i manje od 0,5 mm
- smanjenje potpovršinskih oštećenja
- duža postojanost reznog alata, smanjena temperature rezne oštrice
- ekonomična obrada sinterirane, i drugih naprednih tehničkih keramika (npr. Si_3N_4 , SiC , hip-ZrO_2)
- moguća preciznost dimenzija obratka vrijednosti manje od 10 μm
- optimirano odvođenje odvojene čestice
- smanjena delaminacija vlaknima ojačanih kompozitnih materijala

Prema literaturi [13] na sljedećem primjeru brušenja džepova i utora na uzorcima od „Zerodur stakla“ s i bez ultrazvučnog postupka, bit će prikazani eksperimentalno dobiveni podaci o izmjerenim silama rezanja i kvaliteti površine, na temelju kojih možemo uočiti glavne prednosti ultrazvučnog brušenja u odnosu na konvencionalni postupak. U Tablica 2. navedene su osnovne karakteristike i ulazni podaci za obrade džepova i utora.

Tablica 2. Karakteristike obrade ultrazvučnim brušenjem [13]

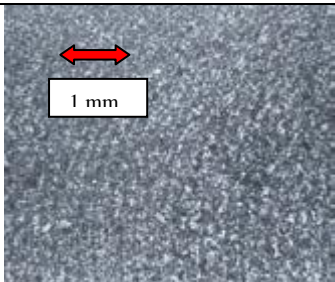
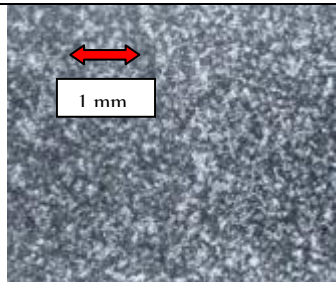
Stroj	ULTRASONIC 20 linear	
Alat	ULTRASONIC aktuator sa HSK-E32-ER11 držaćem alata; GVD glodalo sa MES3 vezivom, Ø 6mm	
<u>Obrada 1</u>		
3 kružna džepa svaki (dim. Ø 11 mm x 10mm)		
Brzina vrtnje glavnog vretena, n	8000 o/min	
Posmak, f	800 mm/min	
Dubina rezanja, a_p	0.25 mm	
Napon, U	75 V _{eff} , ultrazvučno	
Vrijeme obrade, t	85 sekundi po džepu	
<u>Obrada 2</u>		
3 utora svaki (b=6 mm, h=10 mm, l=60 mm)		
Brzina vrtnje glavnog vretena, n	8000 0/min	
Posmak, f	800 mm/min	
Dubina rezanja, a_p	0.4 mm	
Napon, U	75 V _{eff} , ultrazvučno	
Vrijeme obrade, t	141 sekundi po utoru	

Tablica 3. Rezultati: mjerenje sila rezanja [13]

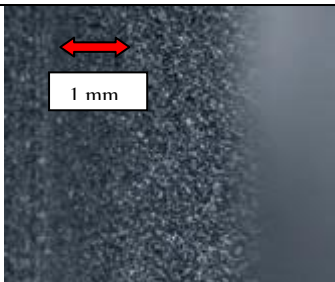
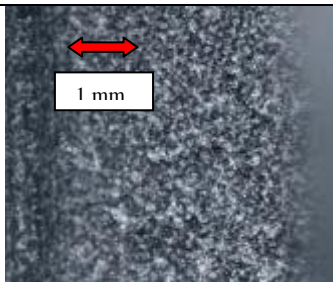
Ispitivanje 3 džepa						
Konvencionalno				Ultrazvučno		
Broj džepa	F_x, N	F_y, N	F_z, N	F_x, N	F_y, N	F_z, N
1.	25	23	75	12	11	54
2.	25	22	66	13	12	60
3.	26	23	70	14	13	61

Ispitivanje 3 utora						
Konvencionalno				Ultrazvučno		
Broj utora	F_x, N	F_y, N	F_z, N	F_x, N	F_y, N	F_z, N
1.	10	50	95	5	25	65
2.	10	50	95	5	35	75
3.	10	45	95	5	30	65

Tablica 4. Rezultati: kvaliteta površine (mikroskop) [13]

	
ultrazvučno	konvencionalno

Donja površina utora			
	Ultrazvučno	Konvencionalno	Odstupanje
R_a , μm	0,74	1,28	-42%
R_z , μm	3,6	7,7	-53%
R_q , μm	0,92	1,65	-44%
R_p , μm	1,0	2,4	-58%

			
ultrazvučno	konvencionalno		
Bočna strana utora			
	Ultrazvučno	Konvencionalno	Odstupanje
R_a , μm	1,15	1,34	-14%
R_z , μm	6,4	8,0	-20%
R_q , μm	1,48	1,72	-14%
R_p , μm	1,8	3,4	-47%

Prema rezultatima prikazanim u Tablica 3. vidi se da su se sile rezanja smanjile za oko 50% i kod obrade džepova i kod utora, do 60% je bolja kvaliteta obrađenih površina, što se opet vidi u Tablica 4., te su smanjene mikropukotine za oko 40%. To samo potvrđuje sve prethodno navedene prednosti ultrazvučnog brušenja.

Proizvodnja visokopreciznih i kompleksnih obradaka zahtjeva fleksibilna rješenja izvedbi strojeva. Uslijed patentirane ultrazvučne tehnologije koja je integrirana u 5-osne obradne centre tvrtke DMG MORI, kompleksni obratci mogu biti ekonomično obrađeni u samo nekoliko stezanja. Za obradu kružno simetričnih obradaka, postoji i nekoliko izvedbi strojeva sa “mill-turn” postupkom obrade.

Najčešća područja primjene postupka ultrazvučnog brušenja i bušenja prema [13] su:

1. Optička industrija

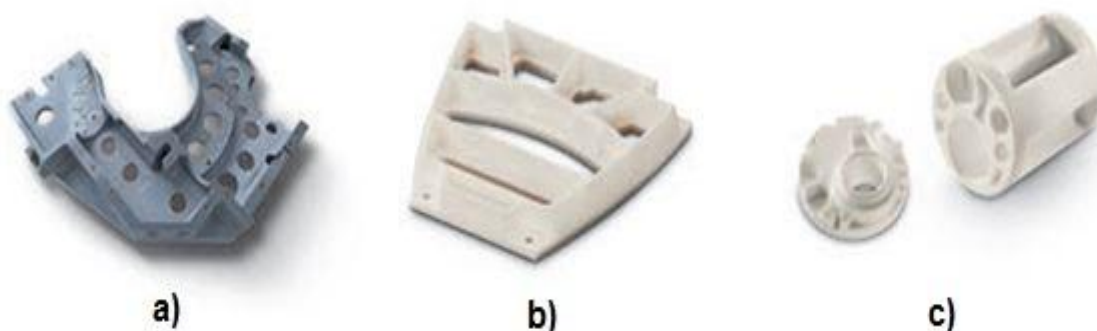
- materijali: optičko staklo prikazano na Slika 23. pod a), kvarcno staklo prikazano pod b), te drugi materijali kao što su keramičko staklo, korund, “zerodur”
- proizvodi: leće, zrcalni nosači, tehnički tankostijeni dijelovi, dijelovi s dubokim provrtima, utorima, džepovima, sferni dijelovi, Slika 23.



Slika 23. Primjeri optičkih dijelova [13]

2. Visokokvalitetni keramički dijelovi, Slika 24:

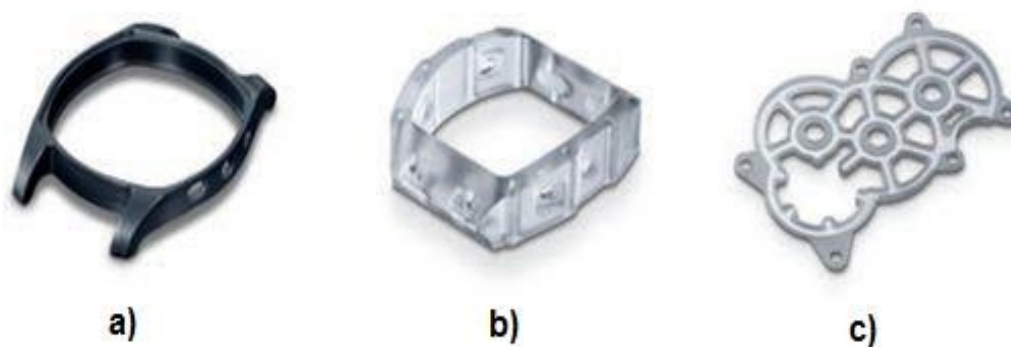
- a) zrakoplovstvo
 - materijali: silikonsi nitridi i karbidi, kompoziti
 - proizvodi: kućišta, potrošni dijelovi, oklopi, lopatice,.
- b) oklopna industrija, pumpe
 - materijali: sve viskokvalitetne keramike otporne na trošenje, staklo
 - proizvodi: kotači pumpe, brtveni i ležajni prsteni, kućišta
- c) dentalna medicina
 - materijali: sve viskokvalitetne keramike, keramičko staklo
 - proizvodi: proteze, implantati, protetika, tehničke optičke komponente



Slika 24. Primjeri visokokvalitetnih keramičkih dijelova po područjima [13]

3. Industrija satova / precizna mehanika:

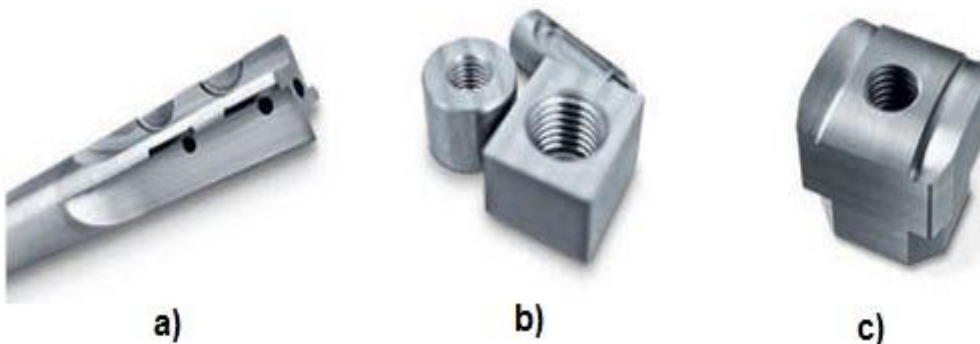
- materijali: cirkonijev oksid, korund (safir), ahaf, rubin
- proizvodi: kućišta satova pod a), pločice, dijelovi sata pod b) i c), ležajevi, koje prikazuje Slika 25.



Slika 25. Primjeri dijelova iz industrije satova [13]

4. Kalupi i matrice:

- materijali: karbidi, visokokvalitetne karamike otporne na trošenje
- proizvodi: vodilice (a), matrice (b), preše, etaloni, ventili, kalupi, ulošci (c), koje prikazuje Slika 26.



Slika 26. Primjeri kalupnih dijelova [13]

5.2.2. Ultrazvučno glodanje

Razvijena ultrazvučna tehnologija sada dodatno olakšava obradu u klasičnoj proizvodnji. Odsada pa nadalje alati sa geometrijski definiranom reznom oštricom se mogu sa sigurnošću koristiti prema [13], zbog dostupnih amplituda i više od 10µm te isto tako i zbog poboljšane krutosti aktuatora. Stoga, sile rezanja su tijekom glodanja naprimjer titanove legure i do 30% manje. Posmak se može udvostručiti prilikom obrade Inconela i upeterostručiti prilikom obrade drugih materijala kao što je magnezij.

Prednosti postupka hibridnog ultrazvučnog glodanja prema [13] su sljedeći:

- veći učinak skidanja čestica tijekom fine obrade
- smanjenje sile rezanja za optimiranu hrapavost
- duža postojanost alata
- optimirano odvođenje čestica smanjuje zagrijavanje alata
- izbjegnuto formiranje rubova tijekom obrade kompozita
- izbjegnuta delaminacija i kidanje vlakana kod kompozita

Najčešća područja primjene prema [13] hibridne tehnologije ultrazvučnog glodanja i bušenja su:

1. zrakoplovstvo

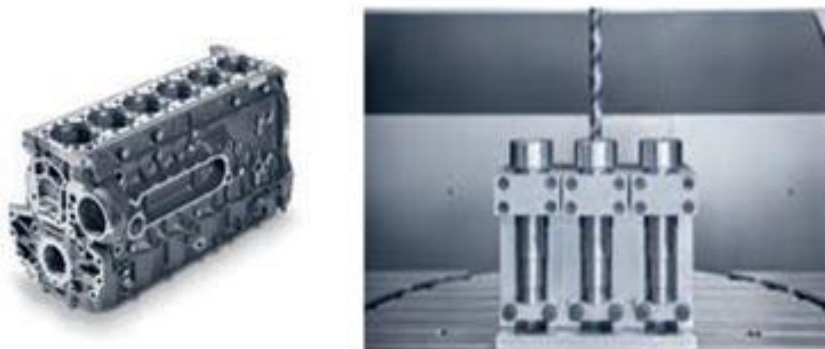
- materijal: Inconel 718
- proizvodi: dijelovi turbine (kućišta, lopatice, prirubnice), Slika 27.



Slika 27. Primjer dijelova turbine [13]

2. automobilska industrija

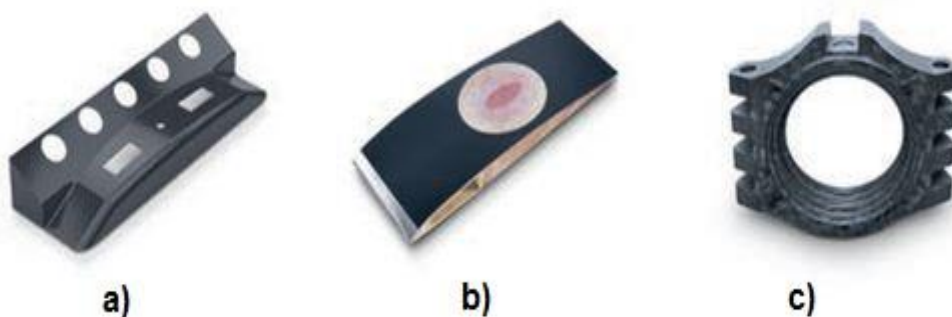
- materijal: ljevovi, MnCr, Al- / Mg- legure, kaljeni čelik,.
- proizvodi: blokovi motora / cilindra koje prikazuje Slika 28., zupčanici, pogonski dijelovi, felge



Slika 28. Primjeri dijelova motora i pogonski dijelovi [13]

3. proizvodnja kompozitnih obradaka

- materijali: CFRP, GFRP, AFRP, drugi kompoziti
- proizvodi: kućišta, dijelovi rotora, interijer automobile (a), oklopi (b), dijelovi satova (c), felge, sportski dijelovi, koje prikazuje Slika 29.



Slika 29. Primjeri kompozitnih dijelova [13]

6. ZAKLJUČAK

Zahtjevi tržišta se svakodnevno mijenjaju i sve su kompleksniji. Sve se više pozornosti daje novim područjima primjene, tehnološkim postupcima obrade novih materijala, koji su sve više zastupljeniji u svjetskoj industriji. Neprekidna je težnja za što boljom kvalitetom obrađenih površina, većom postojanošću reznog alata, povećanoj učinkovitosti i kvaliteti pri obradi novih proizvoda od naprednih materijala. Za zahtjevnije obrade sve kompleksnijih geometrijskih oblika potrebna su učinkovita i ekonomski isplativa tehnološka rješenja koja će osigurati opstanak na današnjem tržištu, gdje vlada sve veća konkurencija. Proizvodna poduzeća sa svojim tehnologijama moraju biti što fleksibilnija u pogledu primjene raznih proizvodnih postupaka, obradi novih materijala, potpuno automatiziranom i autonomnom radu, te brzoj reakciji na zahtjeve suvremenog tržišta.

Zbog navedenih zahtjeva suvremenog tržišta, sve više se razvijaju hibridne tehnologije i hibridni alatni strojevi. Hibridna tehnologija predstavlja kombinaciju proizvodnih postupaka integriranih na jednom obradnom stroju ili platformi. One se razvijaju u smjeru proizvodnje na što produktivniji i ekonomičniji način, kako bi se minimizirali nedostaci pojedinačnih, konvencionalnih postupaka obrade. Postoji niz kombinacija hibridnih tehnologija koje su već razvijene i implementirane u industriji. U ovom radu detaljnije su opisane hibridne tehnologije aditivnih postupaka u kombinaciji s postupcima obrade odvajanjem čestica, te hibridna ultrazvučna obrada odvajanjem čestica. Opisane su i prikazane izvedbe takvih hibridnih alatnih strojeva te su navedene njihove glavne značajke i principi rada. Kao primjeri, izdvojene su izvedbe hibridnih alatnih strojeva tvrtke DMG MORI i tvrtke Mazak.

Hibridna proizvodnja sa aditivnim tehnologijama i tehnologijama obrade odvajanjem čestica otvorila je nova područja primjene i obradu sve kompleksnijih geometrija obradaka. Hibridna tehnologija laserskog oblaganja i obrade glodanja na jednom stroju omogućuje brzu izradu dijelova kompleksnih geometrija, te posebno izradu velikih i skupih komponenti na ekonomičan način. Laserskim oblaganjem se izrađuju zahtjevani oblici obradaka, ili se dodaje materijal na neko određeno mjesto na obratku, te se potom postupkom glodanja isti taj obradak obradi do završnih dimenzija sa zahtjevanom kvalitetom obrađene površine. Primjena ovog postupka je posebno kod popravaka visoko vrijednih oštećenih ili istrošenih dijelova, te kod

prevlačenja dijelova. Takva hibridna tehnologija ima široko područje primjene i to u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, automobilske industriji, industriji nafte i plina, energetskom sektoru i mnogim drugim. Tvrtka DMG MORI razvila je vlastiti hibridni alatni stroj Lasertec 65 3D koji posjeduje navedenu hibridnu tehnologiju, te je navedena još jedna izvedba takvog hibridnog alatnog stroja tvrtke Mazak. Oba stroja pokazuju niz, već gore navedenih prednosti, i mogućnost obrade u odnosu na strojeve koji posjeduju pojedinačne proizvodne postupke, te zbog toga posjeduju ogromni potencijal da postanu vodeća tehnološka rješenja u novom industrijskom razdoblju. Također, hibridno ultrazvučno brušenje, glodanje i bušenje omogućuju ekonomičniju obradu komada kompleksnih geometrija od visokotehnoloških materijala koji su sve zastupljeniji u današnjoj modernijoj industriji, a to su keramika, staklo, korund, volframov karbid, razni kompoziti i drugi. Ovom tehnologijom se omogućuje smanjenje sila rezanja i do 40% u odnosu na konvencionalne obrade što je vrlo bitna značajka. Također se omogućuju veće posmične brzine i dubine rezanja, veća je postojanost reznog alata, te je moguće ostvariti mnogo bolju kvalitetu obrađene površine. Ova se tehnologijom najčešće primjenjuje u optičkoj industriji, industriji satova, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, dentalnoj medicini, te posebno pri obradi kompozitnih dijelova koji su sve zastupljeniji u suvremenoj industriji. Tvrtka DMG MORI posjeduje niz izvedbi hibridnih alatnih strojeva sa ultrazvučnom obradom odvajanja čestica, pri čemu su izdvojeni Ultrasonic 10, Ultrasoni 20 linear i Ultrasonic mobileBlock.

Hibridne tehnologije sa izvedbama hibridnih alatnih strojeva, opisane u ovom radu, postat će sve zastupljenije u suvremenoj, te budućoj industriji. Takvim tehnologijama značajnije se povećava produktivnost zbog mogućnosti obrade dijelova na jednom stroju u jednom stezanju, a isto tako se povećava i ekonomičnost pri izradi obradaka kompleksnijih geometrija zbog mogućnosti fleksibilne izmjene različitih postupaka obrade na jednom stroju. S mogućnošću potpune automatizacije i autonomnog rada, s poboljšanim kontrolnim sustavima i sve razvijenijim inteligentnim sustavima za upravljanje, hibridni alatni strojevi pogodni su za digitalizaciju i međusobno povezivanje s ostalim tehnološkim sustavima preko virtualno-fizičkih sustava. To je budućnost i na tome se zapravo i temelji nadolazeća četvrta industrijska revolucija, pod nazivom Industrija 4.0.

LITERATURA

- [1] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850614001851>
- [2] <http://opus.bath.ac.uk/34855/>
- [3] https://bib.irb.hr/datoteka/830338.Strojarski_izazov_SB_Veza.pdf
- [4] http://titan.fsb.hr/~jpetric/Predavanja/Industrija%204_0.pdf
- [5] Godec, D., Šercer, M., Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] Škorić, Stephan: *Uvod u OOC*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za alatne strojeve
- [7] Cebalo, R., Ciglar, D., Stoić, A., *Fleksibilni obradni sustavi*, Zagreb, 2005.
- [8] <http://en.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d#Intro>
- [9] http://www.dmgmori.com/webspecial/eoy_16/en-US/dmu-65-mb.htm
- [10] <http://en.dmgmori.com/blob/176078/01e15b6a1ada509cb34fa169fafaed17/pl0uk14-lasertec-additive-manufacturing-pdf-data.pdf>
- [11] <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/nx/for-manufacturing/cam/hybrid-additive-manufacturing.shtml#lightview-close>
- [12] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116004777>
- [13] <http://us.dmgmori.com/blob/269958/b23d8087fc832744d806746a7d7bcae4/pu0us-ultrasonic-pdf-data.pdf>
- [14] <http://us.dmgmori.com/blob/172070/5439d5778a35de4a332cd668a5ddb973/pu0uk15-ultrasonic-composite-pdf-data.pdf>

PRILOZI

I. CD-R disc